Untersuchungen über die Erzeugung der roten Cadmiumlinie als Normale erster Ordnung.

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung der Doktorwürde der Naturwissenschaftlichen Fakultät

der Johann Wolfgang Goethe-Universität zu

Frankfurt am Main

Vorgelegt von

Julius Sohns

aus Monzingen an der Nahe

1939

Ludwig Baum – Frankfurt a. M. – Reineckstr. 17–19

1. Gutachter: Professor Dr. M. Czerny
2. Gutachter: Professor Dr. E. Madelung

Tag der mündlichen Prüfung:
19. Dezember 1938

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

Untersuchungen über die Erzeugung der roten Cadmium-Linie als Normale 1. Ordnung.

Als Michelson die Auswertung des Meters in Wellenlängen der roten Cadmiumlinie (λ = 6438, 4696 A. E.) durchführte, benutzte er zur Erzeugung dieser Linie eine Geißlersche Röhre, die etwas Cadmium enthielt und auf ca. 300° C erwärmt wurde. In der Folgezeit wurde bei der Ausmessung von Normalen 2. Ordnung, das sind Präzisionsmessungen von Spektrallinien, die durch direkten Anschluß an die rote Cadmiumlinie gemessen werden, besonders in deutschen Arbeiten zur Erzeugung der Standartlinie der Cadmiumvakuumbogen benutzt. 1) Es ist nicht selbstverständlich, daß diese beiden so verschiedenartigen Lichtquellen auch wirklich die gleiche Linie liefern. Auch auf den Tagungen der International Astronomical Union (I. A. U.) in den Jahren 1925, 1928 und 1932 beschäftigte man sich eingehend mit dem Problem der Erzeugung der Standartlinie 6438. Man legte hier einmal genau die Bedingungen fest, unter denen die Normale 1. Ordnung im Geißlerschen Rohr erzeugt wird und regte an, auch den Cadmium-Vakuumbogen auf seine Eignung zur Erzeugung der Standartlinie zu untersuchen. Es wurden dabei folgende Bedingungen zur Erzeugung der primären Wellenlängennormalen festgelegt:

> „L'étalon primaire de longueur d'ondes, λ = 6438, 4696 du cadmium, sera produit par un courant électrique à haute tension dans un tube à vide portant des électrodes intérieures. La lampe sera maintenue à une température ne dépassant 320° C, et devra donner des différences de marche d'au moins 200 000 longueurs d'ondes. La valeur efficace du courant d'exitation ne depassera pas 0,05 ampère. A la température de la salle, le tube ne sera pas lumineux quand il sera connecté au circuit habituel à haute tension."

1) Z. B. bei P. Eversheim, K. W. Meissner, P. Wallerath.

Es wurde dabei noch offen gelassen, ob die Vorschriften über Temperatur und Stromstärke nötig sind und diese Frage späteren Untersuchungen überlassen. 2)

Mit dieser eingehenden Kennzeichnung der Normallichtquelle stimmt aber eine im Jahre 1927 von der Internationalen Konferenz für Maße und Gewichte gegebene Definition nicht überein, die statt der spektroskopisch klar zum Ausdruck kommenden Bedingung einer Interferenzfähigkeit von wenigstens 200 000 Wellenlängen bestimmte Maße für die Normallampe angibt. Sie hat folgenden Wortlaut:

> „La lumiere doit être produite par un courant électrique à haute tension continu ou alternatif, de fréquence industrielle (à l'exclusion de la haute fréquence), dans un tube à vide ayant des électrodes intérieures. La lampe doit avoir un volume ne dépassant pas 25 cm^3 et un tube capillaire dont le diamètre ne soit pas inférieur à 2 mm; elle doit être maintenue à une temperature voisine de 320 ^{0}, et la valeur du courant qui la traverse ne doit pas excéder 0.02 ampère. A la température ambiante, le tube ne doit pas être lumineux lorsque le circuit à haute tension y est établi."

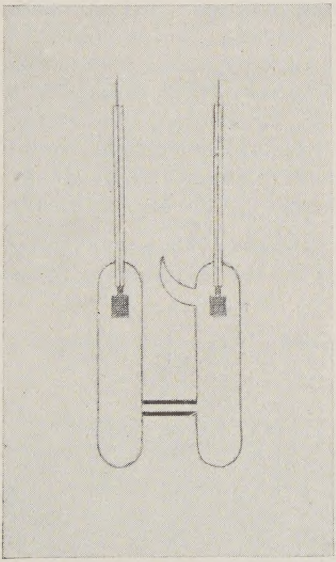
In der vorliegenden Arbeit wurde der Vergleich des Cadmium-Vakuumbogens mit der mit Cadmium gefüllten Geißlerschen Röhre, der sogenannten Michelsonlampe, bis auf große Genauigkeit durchgeführt. Außerdem wurde untersucht, wie sich die Michelsonlampe bei höheren Temperaturen als 320^0 C verhält, sowie der Einfluß einer engeren Kapillaren auf die Aussendung der roten Cadmiumlinie.

2) Transactions of the International Astronomical Union Vol. I–IV.

I. Vergleich des Cadmium Vakuumbogens mit der Michelsonlampe.

1. Lichtquellen.

Die Michelsonlampe, die mir ja als Grundlage meiner Messungen diente, stellte ich so her, daß sie den beiden internationalen Definitionen Genüge leistete. (Siehe Figur 1). Ihr Volumen betrug ca. 24 ccm; die Kapillare hatte einen Durchmesser von 3 mm. Es wurde „end on" beobachtet. Als Elektroden benutzte ich hohlzylinderförmige Aluminiumelektroden.



Figur 1

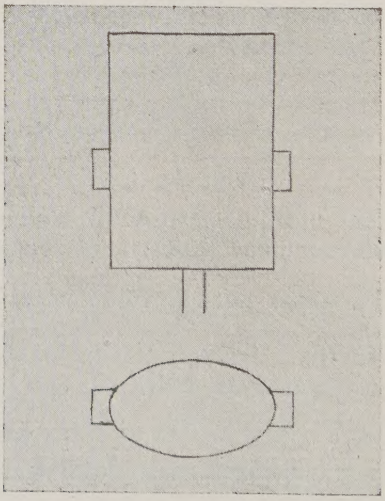
Cadmiumlampe nach Michelson zur Erzeugung der Wellenlängennormalen 1. Ordnung.

Bei den ersten Versuchen mit der Röhre zeigte sich, daß die Einschmelzstellen beim Erwärmen auf höhere Temperaturen die Neigung hatten, undicht zu werden. Um das zu vermeiden, wurde der Einschmelzdraht, wie aus Figur 1 ersichtlich ist, von seinem Austritt aus der Röhre bis zum Austritt aus dem Ofen, in dem die Lampe erwärmt wurde, verglast, sodaß der außerhalb des Ofens gelegene Teil der Einschmelzung und damit auch die ganze Röhre dicht blieb.

Die Röhre wurde mit etwas Cadmium gefüllt, das vor dem Einfüllen zur Reinigung im Vakuum destilliert wurde. Dann wurde sie mit einer Quecksilberdiffusionspumpe auf Hochvakuum leergepumpt und dabei auf etwa 150 ^{0} über die spätere Betriebstemperatur erwärmt. Nachdem alle Verunreinigungen, wie Wasserdampf usw. durch das Erwärmen ausgetrieben waren, wurde die Röhre von der Pumpe abgeschmolzen. Die Röhren waren aus gewöhnlichem Glas. Es wurde auch Duranglas mit Wolfram als Einschmelzdraht benutzt, wobei jedoch bei den hohen Temperaturen die Einschmelzstellen leicht sprangen. Außerdem wurden auch Röhren ausprobiert, bei denen die Einschmelzstellen aus dem Ofen herausragten. Diese hatten jedoch den Nachteil, daß sich der Cadmiumdampf an den aus dem Ofen herausragenden kälteren Stellen niederschlug und allmählich aus der Röhre verdampfte. Um die Röhre wieder betriebsfertig zu machen, mußte das Cadmium durch Erwärmen wieder in das Innere zurückgetrieben werden. Wenn man eine hinreichende Menge Cadmium in die Röhre füllte, daß sich die aus dem Ofen herausragenden Stellen mit Cadmium anfüllten und noch ein Rest in der Röhre verblieb, konnten auch diese Röhren beliebig lange betrieben werden.

Die Michelsonlampe wurde mit einem Funkeninduktor betrieben, die Stromstärke betrug ca. 0,5 Milliampere bei einer Temperatur von 300^0 C.

Den Ofen, in dem die Röhre erwärmt wurde, sieht man in Grund- und Aufriß in Figur 2.

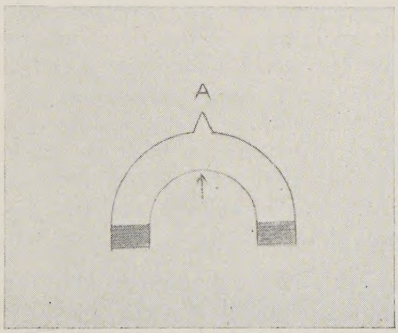


Figur 2.

Ofen zum Erwärmen der Michelsonlampe.

Er wurde elektrisch mit Wechselstrom geheizt und bestand aus einem 3 mm dicken Kupfermantel, um den in Asbest eingebettet die Heizwicklung herumlief. Um eine möglichst gleichmäßige Erwärmung der Röhre zu gewährleisten, war der Querschnitt des Ofens elliptisch. Aus diesem Grunde wurde auch Kupfer als Material für den Ofenmantel benutzt. An einer Asbestplatte aufgehängt wurde die Röhre in den Ofen hineingesetzt, sodaß sich die Röhrenkapillare in Höhe von 2 am Ofen angebrachten Duranglasfenstern befand, durch die das Licht aus dem Ofen austreten konnte. Die Temperatur wurde mit einem Widerstandsthermometer bestimmt, das durch ein Loch der Asbestplatte in den Ofen hineingestellt wurde. An der unteren Wand des Ofens war eine Metallstange angebracht, womit er an einem Stativ befestigt werden konnte.

Der Cadmium-Vakuumbogen, den ich mit der Normallampe verglich, war die Quarzglas-Cadmiumlampe der Firma W. C. Heraeus in Hanau. Sie war mit reinem Cadmium gefüllt, wurde mit 120 Volt Gleichstrom betrieben und war belastbar bis zu einer Stromstärke von 8 Ampere. Die Lampe mußte im Betrieb gekühlt werden und wurde dazu in destilliertes Wasser getaucht. Nur das eigentliche Leuchtrohr, das man in Figur 3 sieht, ragte bis zu den Cadmiummenisken aus dem Wasser heraus.



Figur 3.

Leuchtrohr der Quarzglas-Cadmiumbogenlampe.

Wie die Firma Heraeus in ihrem Prospekt mitteilt, kann die Zündung der Lampe wie beim Quecksilberbogen durch Kippen erfolgen, wenn man das Cadmium durch Erwärmen verflüssigt. Anstelle des

Kippens kann man die Zündung auch mit Induktionsfunken z. B. einer Hochfrequenzapparatur bewerkstelligen. Auch dazu ist vorherige Erwärmung erforderlich.

Die erste Methode ist sehr umständlich und kommt meistens nicht in Frage, da die Lampe gewöhnlich in einem Wasserbad fest montiert ist, wie das auch bei mir der Fall war. Bei der zweiten Methode ist noch eine besondere Hochfrequenzvorrichtung erforderlich, was das Arbeiten mit der Lampe ebenfalls erschwert. Ich habe eine Methode der Zündung ausgearbeitet, die bedeutend einfacher ist, als die oben angegebene und die ich hier kurz beschreiben will.

An der Abschmelzstelle der Lampe, in Figur 3 mit A bezeichnet, schlägt sich beim Betrieb immer etwas Cadmium nieder, weil hier die Kühlwirkung der Luft am größten ist. Wenn man die Lampe anzünden will, legt man die Spannung an die Elektroden und erwärmt dann mit einem Brenner die Lampe von oben, sodaß sich das bei A sitzende Cadmium an dem unteren weniger erwärmten Teil des Leuchtrohres, der in Figur 3 mit einem Pfeil bezeichnet ist, niederschlägt und eine dünne leitende Metallschicht zwischen den beiden Elektroden bildet. Hierdurch fließt dann ein Strom, der in dem sehr dünnen Metallbelag Funken bildet, welche die Zündung bewirken. Die Funkenbildung in der Metallschicht geschieht wahrscheinlich dadurch, daß diese durch die Stromleitungswärme an einigen Stellen zum Schmelzen gebracht und zerrissen wird und hierbei Unterbrechungsfunken entstehen. Sollte sich aus irgendwelchen Gründen an dem oberen Teil des Leuchtrohres bei A kein Cadmium befinden, so kann man durch Erwärmen eines der beiden Cadmiumschenkel stets erreichen, daß sich dort Cadmium niederschlägt. Die Vorteile meiner Zündungsmethode beruhen darin, daß die Lampe nicht gekippt zu werden braucht, also irgendwo fest eingebaut werden kann, und außerdem nur ein Brenner erforderlich ist, der ja bei den beiden anderen Methoden auch benötigt wird.

Nach der Zündung mußte erst einige Minuten gewartet werden, bis sich die Lampe abgekühlt und sich in ihr der reguläre Dampfdruck eingestellt hatte, da direkt nach dem Zünden eine starke Verbreiterung der ausgesandten Linien beobachtet wurde.

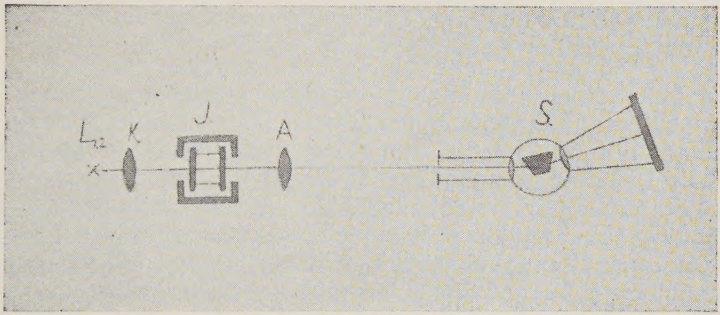
2. Meßmethode und experimentelle Anordnung.

Zum Vergleich der von den verschiedenen Lampen ausgesandten roten Cadmiumlinien benutzte ich die Methode von Perot und Fabry, die ja für derartige Messungen allein in Frage kommt. Es wurde da-

bei die aus der Grundformel des Perot-Fabry Interferometers leicht abzuleitende Formel benutzt:

$$\lambda - \lambda_0 = \frac{\lambda}{2F^2}(R_0^2 - R^2)$$

Dabei sind λ und λ_0 die zu vergleichenden Wellenlängen. R ist ein zu λ gehörender Radius eines Interferenzringes, Ro der zu λ_0 gehörende Interferenzradius, der die gleiche Ordnungszahl hat wie R. F ist die Brennweite der Sammellinse, die in ihrer Fokalebene die Interferenzringe entwirft. Figur 4 zeigt schematisch die Anordnung.



Figur 4.

Anordnung zum Vergleich von Wellenlängen nach der Methode von Perot-Fabry.

$L_{1/2}$ Lichtquelle, K Kondensor, J Interferometer, A Achromat, S Spektrograph.

Von den beiden zu vergleichenden Lichtquellen L_1 bezw. L_2, die ungefähr im Brennpunkt eines asphärischen Kondensors K von 7 cm Brennweite stehen, fällt das Licht als annähernd paralleles Strahlenbündel in das Interferometer J, das symmetrisch zur optischen Achse im Strahlengang sitzt. Hinter dem Interferometer befindet sich ein Achromat A, der in seiner Fokalebene das Interferenzringsystem abbildet. In der Fokalebene von A ist der Spalt eines stigmatisch abbildenden Spektrographen S so angebracht, daß er durch das Zentrum des Ringsystems läuft. Durch den Spektrographen werden dann die einzelnen Wellenlängen getrennt, und jede Linie kann mit ihrem dazugehörigen interferometrischen Ringsystem in der Kassette des

Spektrographen photographiert werden. Der Spektrograph, der von der Firma Schmidt und Haensch war, hatte eine sehr gut korrigierte Glasoptik. Die Brennweite betrug 25 cm, das Öffnungsverhältnis 1:8. Die Dispersion war verhältnismäßig gering, was aber in meinem Fall nicht störte, da das Cadmiumspektrum in der Nähe der roten Linie keine andere stärkere Linie hat. Die Kassette hatte das Format 6,5×9 und war verschiebbar angeordnet, sodaß auf eine Platte übereinander 3 verschiedene Aufnahmen gemacht werden konnten. Der Achromat hatte eine Brennweite von ca. 47 cm. Kondensor, Interferometer und Achromat waren auf einer gußeisernen optischen Bank verschiebbar angeordnet. Um den Aufbau möglichst stabil und erschütterungsfrei zu machen, ruhte das Ganze auf einer 3 cm dicken Schieferplatte. Es wurde sehr genau darauf geachtet, daß Lichtquelle, Linsen und Interferometer sorgfältig in die optische Achse des Spektrographen einjustiert waren.

Als Interferometer stand mir ein ganz vorzügliches Instrument der Firma Karl Zeiss, Jena, gebaut nach Hansen zur Verfügung, es hatte fehlerfreie Quarzplatten von einem nutzbaren Durchmesser von 6 cm. Die Distanzringe waren aus Invar. Durch Zusammensetzen der beiden größten Ringe war es möglich, eine Etalondicke von 26 mm zu erhalten. Um Temperaturschwankungen fern zu halten, war das Interferometer mit einem wattierten Kasten umgeben. Mit einem kleinen Thermometer konnte die Temperatur am Etalon selbst abgelesen und etwaige Schwankungen sofort festgestellt werden. Außerdem war das Instrument so beschaffen, daß durch kleine Temperaturschwankungen hervorgerufene Dickenänderungen durch die Änderung der Luftbrechung gerade kompensiert wurden.

Es waren noch zwei weitere Etalons vorhanden, beide von einem Plattendurchmesser von 2,5 cm, die Distanzen von 50 bezw. 120 mm zuließen. Diese wurden jedoch nur bei der Untersuchung der Interferenzfähigkeit von Linien benutzt, während bei den endgültigen Vergleichsmessungen das weit bessere Etalon von Zeiss mit einem Plattenabstand von 26 mm zur Verwendung kam.

Die Radien der Interferenzringe, die man auf den Aufnahmen erhält, sind nicht die Radien, die von der Sammellinse in der Fokalebene entworfen werden, sondern entsprechend dem Vergrößerungsverhältnis des Spektrographen vergrößert bezw. verkleinert. Es war deshalb nötig, das Vergrößerungsverhältnis des Spektrographen zu bestimmen. Dazu wurden auf einem Rähmchen 5 einige μ dicke Glasfäden angebracht, die unter dem Komparator unter sich parallel ausgerichtet und mit Zapponlack befestigt wurden. Das Rähmchen konnte

am Spalt festgeschraubt werden, sodaß die Fäden senkrecht zur Spaltrichtung über den Spalt verliefen. Es wurde dann die Cadmiumlinie 6438 A. E. ohne Interferometer photographiert, und die Bilder der vor dem Spalt angebrachten Fäden durchzogen sie als feine weiße Striche. Der Quotient der Entfernungen der Bilder auf der Aufnahme und den dazu gehörigen Entfernungen der Fäden auf dem Rähmchen ergab dann das Vergrößerungsverhältnis.

Bei der Einstellung des Achromaten, in dessen Brennebene sich der Spektrographenspalt befinden muß, wurde folgendermaßen verfahren: In dem roten Teil des Spektrums in der Kassette des Spektrographen wurde ein kleines Lämpchen angebracht, welches aus dem Spalt ein schmales rotes Lichtbündel aussandte. An dem Spalt selbst wurde das Rähmchen mit den feinen Fäden angebracht. Vor die Linse A wurde dann ein auf unendlich eingestelltes Fernrohr gestellt, und die Linse solange verschoben, bis die rot beleuchteten Fäden auf dem Spalt im Fernrohr scharf erschienen. Die Feineinstellung wurde dann mit Hilfe des Interferometers selbst vorgenommen, wobei auf größte Schärfe der Interferenzringe eingestellt wurde. Das konnte entweder photographisch gemacht werden, oder indem man die Interferenzringe in der Kassettenebene mit einer stark vergrößernden kurzbrennweitigen Lupe betrachtete. Die Abweichungen verschiedener Einstellungen, die an einer Millimeterskala abgelesen werden konnten, betrugen weniger als 0,5 mm voneinander.

Die Größe der Brennweite F der abbildenden Linse wurde aus den Interferenzaufnahmen selbst berechnet. Es wurde dabei eine Methode angewandt, die eine verhältnismäßig hohe Genauigkeit ergab. (In dem hier vorliegenden Fall wurde allerdings diese Meßgenauigkeit nicht benötigt.) Da diese Methode auch allgemein zur Bestimmung einer Brennweite geeignet ist, will ich sie hier näher beschreiben.

Die Grundformel für das Perot-Fabry Interferometer lautet $2e \cos \varphi = p. \lambda$, wobei λ die Wellenlänge des einfallenden Lichtes ist, p die Ordnungszahl eines Interferenzringes und φ der Winkel, den das parallele Strahlenbündel, das den Interferenzring erzeugt, mit der Plattennormale bildet. Es gilt außerdem die Beziehung $\operatorname{tg} \varphi = R/F$, wobei F die gesuchte Brennweite der Sammellinse und R der Radius des Interferenzringes der Ordnung p bedeuten. Da nur sehr kleine Winkel φ in Frage kommen, kann man setzen $\varphi = R/F$ oder für $\cos \varphi$ unter Vernachlässigung von Gliedern der Ordnung φ^4: $\cos \varphi = 1 - R^2/2F^2$.

Also $2e\,(1-R^2/2F^2) = p.\lambda$

Für 2 verschiedene Ringe R_1 und R_2 derselben Wellenlänge gilt

dann: $2e\,(1-R_1^2/2F^2) = p_1\,\lambda$
$2e\,(1-R_2^2/2F^2) = p_2\,\lambda$

oder: $2e\left(\frac{R_2^2-R_1^2}{2F^2}\right) = \lambda\,(p_1-p_2)$

Da jeder Ring einer Wellenlänge gegen den vorhergehenden die Ordnungszahlendifferenz 1 hat, läßt sich $p_1 - p_2$ durch Abzählen der Ringe, die zwischen R_1 und R_2 liegen, bestimmen. Setzt man $p_1 - p_2 = k$ so ergibt sich

$$e\,\frac{R_2^2-R_1^2}{F^2} = k\cdot\lambda$$

$$\text{oder: } F = \sqrt{\frac{e\,(R_2^2-R_1^2)}{\lambda\,k}}$$

Zur Bestimmung von F müssen also bekannt sein die Wellenlänge der Spektrallinie, die Etalondistanz e und mindestens 2 Interferenzradien der betreffenden Wellenlänge. Nimmt man das Ringsystem mit einem Spektrographen auf, was ja im allgemeinen der Fall sein dürfte, so muß man, wie oben schon näher ausgeführt ist, das Vergrößerungsverhältnis des Spektrographen kennen. Als Wellenlänge nimmt man eine genau ausgemessene Linie irgendeines Elementes, etwa eine Normale 2. Ordnung. In dem hier vorliegenden Fall wurde natürlich die rote Cadmiumlinie benutzt. Den Abstand e der Etalonplatten kann man durch Ausmessen des Etalondistanzringes mit einer Mikrometerschraube bis auf 0.01 mm bestimmen.

Die Methode habe ich einmal näher untersucht und auf ihre Genauigkeit hin geprüft. Wie auch aus der Formel zu erwarten ist, wird die Bestimmung umso genauer, je kleiner e ist. Bei e = 26 mm, also einem verhältnismäßig großen Abstand, ergab sich aus 12 Messungen bei 4 voneinander unabhängigen Einstellungen der Linse ein mittlerer Fehler von $1\,^0/_{00}$. Bei kleinerem e ließ sich die Meßgenauigkeit noch steigern. Falls die Linse nicht chromatisch korrigiert ist, erhält man die Brennweite für die jeweils benutzte Wellenlänge.

Eine ähnliche Methode, die auf dem gleichen Prinzip beruht, wird von Wallerath 3) in einer Arbeit angegeben. Dieser gebraucht jedoch eine Formel, die die Berechnung wesentlich komplizierter gestaltet. Statt der Entfernung der Etalonplatten benutzt er die genauen Ordnungszahlen der Interferenzringe. Er braucht zur Bestimmung der Ordnungszahlen mindestens 2 auseinanderliegende Wellenlängen und eine verhältnismäßig lange Rechnung, wodurch die Methode wesentlich umständlicher wird.

3. Durchführung der Messung.

Bei der praktischen Durchführung der Aufnahmen wurde, da es offenbar nicht möglich war, die beiden zu vergleichenden Linien gleichzeitig aufzunehmen, zuerst eine Aufnahme des Cadmiumbogens gemacht. Sodann wurde an die Stelle des Bogens die Michelsonlampe gebracht und die von ihr ausgesandte rote Cadmiumlinie aufgenommen, und endlich nochmals eine Aufnahme mit dem Vakuumbogen gemacht. Es wurde auch umgekehrt verfahren, indem die erste und dritte Aufnahme mit der Michelsonlampe und die zweite mit dem Bogen gemacht wurden. Auf einer Platte befanden sich dann drei zueinander gehörige Aufnahmen übereinander. Aus der ersten und dritten wurde nachher bei der Ausmessung das Mittel genommen, um etwaige Fehler, die sich durch Änderungen des Interferometers während der Aufnahme ergeben konnten, auszuschalten. Der Cadmiumbogen wurde bei verschiedenen Stromstärken untersucht. Zur Kontrolle wurden außer dem direkten Vergleich mit der Michelsonlampe auch die roten Cadmiumlinien, die von demselben Bogen bei verschiedenen Stromstärken ausgesandt werden, miteinander verglichen. Dadurch, daß der Cadmiumbogen genau so wie die Michelsonlampe auf den Spalt abgebildet wurde, durchstrahlte das Licht beider Lichtquellen den Kondensor, das Interferometer, den Achromaten und den Spalt genau in der gleichen Weise, was zum Eliminieren von etwaigen Fehlern in der Anordnung (Linsenfehler, nicht genaue Planparallelität der Interferometerplatten und dergleichen) ein unbedingtes Erfordernis ist. Bei der Justierung des Interferometers, welches der empfindlichste Teil der ganzen Anordnung ist, wurde die größte Sorgfalt angewandt. Beim Zusammensetzen wurden die Etalondistanzringe stets gut gereinigt und nach jeder Aufnahmeserie, worunter die 3 zueinandergehörigen Aufnahmen verstanden werden, die Justierung geprüft. Das Instrument von Zeiss blieb sehr gut kon-

3) P. Wallerath, Annalen d. Phys. 75, 1924.

stant. Bei den beiden anderen Etalons zeigten sich nach einer Aufnahmeserie oft Verschiebungen, weshalb sich mit ihnen nicht dieselbe hohe Meßgenauigkeit erreichen ließ wie mit dem Zeiss'schen. Sie wurden deshalb, wie schon oben erwähnt, zu den endgültigen Aufnahmen nicht benutzt. Als Aufnahmematerial dienten mir Agfa Isopanplatten I S S 20/10° Din, die sich speziell im roten Gebiet als sehr empfindlich erwiesen. Bei dem Cadmiumbogen kam ich mit Belichtungszeiten von einer Sekunde aus; bei der verhältnismäßig lichtschwachen Michelsonlampe wurden 3 Minuten benötigt. Die gesamte Dauer einer Aufnahmeserie betrug also höchstens 10 Minuten. Während dieser Zeit blieb die Temperatur am Interferometer sehr konstant. Die größten Schwankungen, die beobachtet wurden, betrugen nur einige Zehntel Grad. In den meisten Fällen war jedoch überhaupt kein Gang des Thermometers festzustellen. Die Ausmessung der Interferenzradien auf den Aufnahmen erfolgte mit einem Komparator von Zeiss. Gewöhnlich wurden die 3 innersten Interferenzringe einer Aufnahme zur Auswertung benutzt. Die verschiedenen Rechnungen wurden mit einer elektrisch betriebenen Rechenmaschine ausgeführt.

4. Ergebnisse.

Der Vergleich des Cadmiumvakuumbogens mit der Michelsonlampe ergab, daß bei Stromstärken des Bogens bis 4.5 Ampere dieser die gleiche rote Cadmiumlinie aussendet wie die Michelsonlampe. Bei Belastungen des Bogens mit höheren Stromstärken ergibt sich eine Verbreiterung der Linie und eine Verschiebung nach der langwelligen Seite des Spektrums. In Tabelle 1 sind die Ergebnisse dargestellt.

Stromstärke	Verschiebung in A E
3 Amp.	$<$ 0.0003
4,5 Amp.	$<$ 0.0003
6 Amp.	0.0009
8 Amp.	0.0031

Tabelle 1.

Ergebnis des Vergleiches der Michelsonlampe mit dem Cadmiumvakuumbogen bei verschiedenen Stromstärken.

Es wurde dabei die Mitte des Leuchtrohres des Bogens auf den Spalt abgebildet. Außerdem wurde aber auch das Licht, das von anderen Stellen des Leuchtrohres besonders in der Nähe der Elektroden ausgesandt wird, mit dem von der Mitte ausgesandten verglichen,

um einen etwaigen Pol-Effekt oder dergleichen festzustellen. Eine Verschiebung der Linie 6438 wurde dabei nicht gemessen. Demnach ist es gleichgültig, welche Stelle des Bogens benutzt wird.

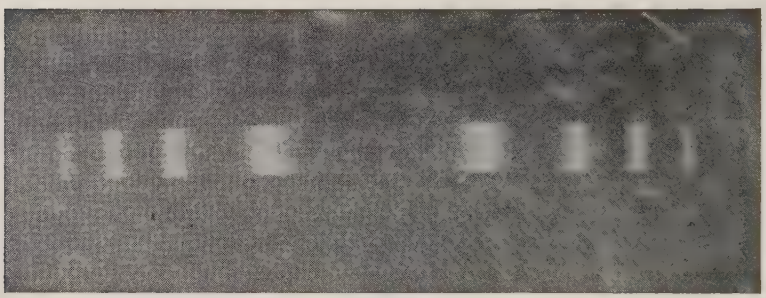
Die Gefahr, daß sich bei meinen Messungen Abweichungen ergaben, die durch chromatische oder astigmatische Fehler in der Anordnung verursacht wurden, bestand nicht; solche Fehler mußten sich ja auf beide zu vergleichenden Linien in der gleichen Weise auswirken, weil diese in genau dem gleichen Gebiete des Spektrums lagen. Größere Fehler konnten nur durch unregelmäßige Änderungen am Interferometer während einer Aufnahmeserie vorkommen. Um diese auszuschalten, mußte eine größere Anzahl Messungen gemacht werden. Bei der guten Beschaffenheit des Interferometers, wegen der Sicherung gegen Temperaturänderungen, sowie endlich auch wegen der Kürze der Belichtungszeiten erwiesen sich aber diese Abweichungen vom Mittelwerte als sehr gering und lagen innerhalb der Fehlergrenze, die durch die Linienbreite gegeben ist.

Wegen der Ausschaltung anderer Fehlerquellen war also die Meßgenauigkeit allein gegeben durch die Genauigkeit, mit der die Interferenzradien auf der Platte ausgemessen werden konnten. (Von den Fehlern, die durch ungenaue Brennweitenbestimmung entstehen, kann man absehen, da diese im Verhältnis zu den anderen Fehlern klein sind.) Beim Vergleich des 3 Ampere-Bogens mit der Michelsonlampe war es möglich, die Radien bis zu einem mittleren Fehler von 0,001 – 0,002 mm zu messen. Wie man aus der Formel

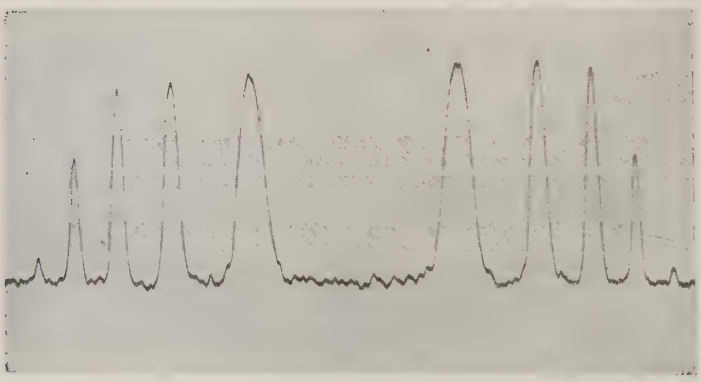
$$\lambda - \lambda_0 = \frac{\lambda}{2F^2} (R_0^2 - R^2)$$

ausrechnen kann, entspricht bei einem Radius von ca. 3,5 mm, welches ungefähr die Größe des zweitinnersten Radius war, einem Fehler von 0,002 mm ein solcher des Wellenlängenunterschiedes von 0,0002 AE. Da sich das Resultat aus 2 Radienmessungen zusammensetzt, war also im ungünstigsten Fall ein Fehler des Resultates von 0,0004 AE zu erwarten. Die Meßergebnisse zeigten aber, daß der mittlere Fehler des Gesamtergebnisses, das aus vielen Aufnahmen gewonnen wurde, nur 0,0001 AE betrug. Die größte Abweichung der Ergebnisse, die aus einer einzelnen Aufnahme gewonnen waren, vom Mittelwert war 0,0006 AE. Diese Abweichung kam aber nur bei einer einzigen Messung vor, während sie bei allen anderen nie mehr als 0,0003 AE betrug. Eine absolute Genauigkeit von 0,0003 AE dürfte demnach nicht zu hoch angegeben sein.

Zur Beurteilung dieser Angaben zeigt Figur 5 die achtfache Vergrößerung einer Interferometeraufnahme des Cadmium-Bogens von 3 Amp. Stromstärke. Figur 6 stellt eine Photometerkurve derselben Aufnahme in ebenfalls achtfacher Vergrößerung dar. Die Photometerkurve wurde mit einem lichtelektrischen Registrierphotometer von Zeiss aufgenommen.



Figur 5.
Achtfache Vergrößerung des Interferenzringsystems der roten Cadmiumlinie erzeugt vom Cadmiumvakuumbogen von 3 Ampere Stromstärke bei einem Etalon von 26 mm Plattenabstand.



Figur 6.
Photometerkurve der in Figur 5 dargestellten Aufnahme bei achtfacher Vergrößerung.

Zu Figur 5 ist zu bemerken, daß durch die Reproduktion die Schärfe und die Feinheiten der Originalaufnahmen verloren gingen. Die Photometerkurve in Figur 6 zeigt besser, wie scharf die Maxima definiert waren. Jedoch macht sich hier besonders bei dem innersten Ring und in etwas geringerem Maße auch noch beim zweitinnersten Ring das Plattenkorn störend bemerkbar. Die Maxima erscheinen deshalb etwas weniger scharf. Bei der Ausmessung einer solchen Aufnahme unter dem Komparator abstrahiert das Auge von diesen kleinen Unregelmäßigkeiten, die durch das Plattenkorn hineinkommen, während das Photometer darauf anspricht. Da in einem Interferenzspektrum der Maßstab nicht konstant ist, so entspricht im Falle der Figur 5 bei dem innersten Ring (R = 1.7 mm) einem Wellenlängenunterschied von 0.0001 AE ein solcher des Radius von ca. 0,002 mm. Bei diesem Ring ist deswegen nur die halbe Meßgenauigkeit bei der Messung des Radius nötig, wie z. B. bei dem 3. Ring (R = 3,8 mm), um zu derselben Genauigkeit der Wellenlänge zu kommen. Die Meßgenauigkeit ist deshalb unabhängig davon, welchen Ring man zur Auswertung benutzt.

Die Tabellen 2,3 und 4 zeigen eine Zusammenstellung von Messungen, die beim Vergleich der Michelsonlampe mit dem Cadmiumbogen von 3 Amp. aus 3 verschiedenen Aufnahmen gewonnen wurden. In den beiden ersten Spalten sind die sich entsprechenden Interferenzradien der Michelsonlampe und der Bogenlampe angegeben, in der 3. Spalte die daraus folgende Wellenlängendifferenz $\Delta \lambda = \lambda$ (Normal) $- \lambda$ (Bogen), in der 4. Spalte schließlich der aus einer Aufnahme resultierende Mittelwert. Nur solche Abweichungen vom Mittelwert, wie sie in Tabelle 2 und 3 vorkommen, waren die Regel. Tabelle 4 zeigt einen Ausnahmefall, bei dem die Abweichungen besonders groß waren.

Interferenzradien der Michelson-lampe in mm	Interferenzradien der Bogen-lampe in mm	$\Delta\lambda$ in AE	Mittel
$R_1 = 2.076$	$R_1 = 2.073$	− 0.0002	
$R_2 = 3.156$	$R_2 = 3.155$	− 0.0001	− 0.0002 AE
$R_3 = 3.955$	$R_3 = 3.953$	− 0.0002	

Tabelle 2.

$R_1 = 2.113$	$R_1 = 2.120$	+ 0.0004	
$R_2 = 3.180$	$R_2 = 3.184$	+ 0.0003	+ 0.0002 AE
$R_3 = 3.977$	$R_3 = 3.977$	0	

Tabelle 3.

$R_1 = 2.045$	$R_1 = 2.039$	− 0.0004	
$R_2 = 3.134$	$R_2 = 3.130$	− 0.0004	− 0.0006 AE
$R_3 = 3.943$	$R_3 = 3.935$	− 0.0009	

Tabelle 4.

Tabelle 2, 3 und 4:
Zwischenergebnisse, die aus der Ausmessung von einzelnen Aufnahmen gewonnen wurden, wobei die 3 innersten Interferenzringe zur Auswertung benutzt wurden.

Es ist vielleicht zweckmäßig, die Angaben über die erreichte Genauigkeit noch von einer anderen Seite zu betrachten. Wie aus photometrischen Arbeiten hervorgeht, lassen sich Intensitätsunterschiede bis zu einer Genauigkeit von ungefähr 1 % bestimmen. Berechnet man nun in dem vorliegenden Fall, wie groß der Winkelunterschied ist, für den ein Intensitätsmaximum um 1 % seiner Maximalintensität abgesunken ist, so hat man damit ein gewisses Maß, wie genau überhaupt ein Maximum definiert ist, bezw. welche Meßgenauigkeit man im günstigsten Fall zu erwarten hat. Dieser Winkelabstand bei einem Interferenzring wurde theoretisch, unter Berücksichtigung der Mehrfachreflexion bei einem neunzigprozentigen Reflexionsvermögen der versilberten Interferometerplatten berechnet. Die Rechnung ergab

einen Winkelabstand, der unter Annahme einer monochromatischen Intensitätsverteilung bei den vorliegenden Bedingungen (Ordnungszahl ungefähr 81000, λ = 6438 AE) in Wellenlängen ausgedrückt 0,0001 AE ausmacht.
Daß in meinem Falle diese Genauigkeit nicht erreicht wurde, liegt daran, daß in Wirklichkeit jede Linie eine gewisse natürliche Breite hat. Aber jedenfalls sieht man, daß die von mir angegebene Genauigkeit nicht das übersteigt, was bei dem benutzten Etalonabstand nach der obigen Ueberlegung im günstigsten Falle erwartet werden kann.

Vergleicht man im Gegensatz dazu das in der üblichen Weise definierte Auflösungsvermögen des Interferometers mit der erreichten Meßgenauigkeit, so findet man, daß der Wellenlängenunterschied, der gerade noch getrennt werden kann, ca. 0,004 AE beträgt, also etwa zehnmal so groß wie die Meßgenauigkeit ist. Das ist jedoch in keiner Weise ein Widerspruch, da ja das Maximum einer einzelnen Interferenzlinie stets genauer definiert ist, als der Wert des kleinsten noch trennbaren Wellenlängenunterschiedes zweier nebeneinanderliegender, sich zum Teil überdeckender Linien beträgt.

Es sei hier noch erwähnt, daß eine weitere Vergrößerung des Etalonabstandes keine wesentliche Erhöhung der Meßgenauigkeit gebracht hätte. Die Interferenzen werden dann nicht mehr schärfer, weil die natürliche Linienbreite dann schon in Erscheinung tritt.

Beim Vergleich des Bogens bei höheren Stromstärken nahm die Meßgenauigkeit wegen der einsetzenden Linienverbreiterung ab. So ergab sich bei dem 6 Ampere-Bogen ein mittlerer Fehler von 0.0002 AE bei einer maximalen Abweichung vom Mittelwert von 0.0008 AE. Beim Bogen von 8 Ampere Stromstärke, der eine sehr breite Linie lieferte, war der mittlere Fehler der Messung 0.0007 AE bei einer maximalen Streuung von 0,002 AE.

Es wurde außerdem die Interferenzfähigkeit der von dem Bogen erzeugten roten Cadmiumlinie untersucht, die ja ein Maß für die Schärfe der Linie darstellt. Hierzu wurde ein Perot-Fabry Interferometer benutzt, das einen Plattenabstand von 68 mm besaß, was einer Ordnungszahl der Interferenzringe von ungefähr 210 000 entspricht. Dabei zeigte sich, daß die rote Cadmiumlinie, die von einem mit 3 Ampere betriebenen Bogen ausgesandt wird, noch sehr scharfe Interferenzen ergab, die denen der Michelsonlampe an Schärfe in keiner Weise nachstanden. Bei 4 Ampere Stromstärke des Bogens wurden die Interferenzringe breiter, blieben aber noch deutlich sichtbar und waren noch wohl definiert. Erst bei 4,5 Ampere begannen sie inein-

ander überzugehen und waren nur noch undeutlich zu erkennen. Bei 6 Ampere waren schon bei einem Interferometerabstand von 50 mm, was Ordnungszahlen von ca. 155 000 entspricht, keine Interferenzen mehr zu erhalten; bei 8 Ampere war dies schon bei einer Etalondistanz von 36 mm der Fall.

Es ergeben sich also keine Bedenken, den Cadmiumvakuumbogen, der mit reinem Cadmium gefüllt ist, zur Erzeugung der Normalen 1. Ordnung zu verwenden. Es muß lediglich wie bei der Michelsonlampe eine gewisse Linienschärfe gefordert werden. Entweder kann man dies ebenfalls durch die Bedingung der Interferenzfähigkeit bis zu einem Gangunterschied von 200 000 Wellenlängen, weil ja dann die Linie noch keine Verschiebung zeigt, oder durch Festlegen einer Höchststromstärke. Nach den obigen Meßergebnissen dürfte man eine Stromstärke bis höchstens 4,5 Ampere zulassen. In dem Cadmiumbogen hat man eine betriebssichere Lichtquelle, die vor der Michelsonlampe viele Vorzüge hat. Man braucht keinen besonderen Ofen, die Lebensdauer ist fast unbeschränkt, die Intensität ist bedeutend höher, und es ist mit ihm überhaupt viel angenehmer zu arbeiten als mit der Michelsonlampe. Aus diesen Gründen ist es durchaus angebracht, neben der Michelsonlampe den Cadmiumvakuumbogen zur Erzeugung der primären Normalen zuzulassen.

II. Untersuchung der Michelsonlampe bei Temperaturen über 320°.

Um das Verhalten der Michelsonlampe inbezug auf die Aussendung der roten Cadmiumlinie bei höheren Temperaturen festzustellen, wurde sie bei einer Temperatur von 425° C untersucht. Anordnung und Meßverfahren waren dabei genau so wie beim Vergleich des Bogens. Es wurde zuerst eine Aufnahme der Michelsonlampe bei 300° gemacht, sodann die Lampe auf eine Temperatur von 425° gebracht und die rote Cadmiumlinie aufgenommen und nach Abkühlen auf 300° die 3. Aufnahme gemacht. Zur Kontrolle wurde außerdem die Michelsonlampe bei 425° mit dem Cadmiumbogen von 3 Ampere verglichen; hierbei war die Dauer der Aufnahme wesentlich kürzer, da nicht gewartet zu werden brauchte, bis die Lampe auf höhere Temperatur gebracht bezw. wieder abgekühlt war. Die Stromstärke der Michelsonlampe bei 425° betrug 1.5 Milliampere.

Die Michelsonlampe bei 425° lieferte abgesehen von der Verbreiterung die gleiche rote Cadmiumlinie wie die Normallampe. Eine Verschiebung konnte nicht festgestellt werden. Der mittlere Fehler der Messung betrug 0.0003 AE. Bei 425° konnten keine Interferenzen mehr bei einem Gangunterscheid von 200 000 Wellenlängen erhalten werden, d. h. bei dieser Temperatur genügt die Lampe hinsichtlich der Linienschärfe nicht mehr den Bedingungen der I.A.U.

Solange die Michelsonlampe die vorgeschriebene Interferenzfähigkeit hat, tritt auch bei höheren Temperaturen als 320° keine Verschiebung der Cadmiumlinie 6438 ein. Die Wellenlänge bleibt sogar dieselbe, wenn die Linie wegen der durch die höhere Temperatur bedingten Breite nicht mehr bei 200.000 Wellenlängen Gangunterschied Interferenzen ergibt. Es ist demnach unnötig, bei der Michelsonlampe außer der Interferenzfähigkeit auch noch die Temperatur der Lampe vorzuschreiben, wie das in der von der I.A.U. gegebenen Definition der Fall ist. Ich habe nicht untersucht, bei welcher Temperatur die vorgeschriebene Interferenzfähigkeit aufhört, habe aber bei 370° bei einer Etalondistanz von 68 mm noch einigermaßen scharfe Interferenzringe erhalten.

III. Untersuchung der Michelsonlampe bei enger Kapillaren.

Um einen etwaigen Einfluß einer engen Kapillaren in der Michelsonlampe festzustellen, wurde eine Lampe von ca. 1.3 mm Kapillarendurchmesser untersucht. Diese Lampe wurde mit dem Cadmiumbogen von 3 Ampere Stromstärke verglichen. Auf den direkten Vergleich mit der Michelsonlampe mit weiter Kapillare mußte ich verzichten, da mir kein zweiter Ofen zur Verfügung stand. Es wurde kein Unterschied gegenüber dem 3 Ampere Bogen und damit auch gegenüber der Michelsonlampe mit weiter Kapillare festgestellt bis zu einem mittleren Fehler von 0.0002 AE. Auch hinsichtlich der Linienschärfe bestand kein Unterschied, wie eine Aufnahme bei einem Etalonabstand von 68 mm zeigte. Die Bedingung der Konferenz für Maße und Gewichte, daß der Kapillarendurchmesser nicht kleiner als 2 mm sein darf, ist also in dieser Form nicht nötig.

Zusammenfassung.

In der vorliegenden Arbeit wurde die rote Cadmiumlinie als Normale 1. Ordnung, wie sie von der Michelsonlampe ausgesandt wird, interferometrisch verglichen mit der von dem Cadmiumvakuumbogen ausgesandten Linie. Dabei wurde bis zu einer Stromstärke des Bogens von 4,5 Ampere eine Uebereinstimmung beider Linien bis zu einer Meßgenauigkeit von 0.0003 AE festgestellt. Ebenfalls genügte der Bogen bis zu dieser Stromstärke der Bedingung der Interferenzfähigkeit bis 200 000 Wellenlängen Gangunterschied. Bei höheren Stromstärken des Bogens nahm die Interferenzfähigkeit ab, und es trat eine Verschiebung der Linie nach der langwelligen Seite ein. Damit wurde nachgewiesen, daß der mit reinem Cadmium gefüllte Vakuumbogen bis zu einer Stromstärke von 4.5 Ampere zur Erzeugung der Normalen 1. Ordnung verwendet werden kann. Weiter wurde gezeigt, daß es nicht nötig ist, bei der Michelsonlampe eine bestimmte Temperatur vorzuschreiben, sobald man die Bedingung einer Interferenzfähigkeit der Normalen 1. Ordnung bis zu einem Gangunterschied von 200.000 Wellenlängen fordert. Außerdem wurde ein etwaiger Effekt in der Michelsonlampe bei Benutzung enger Kapillaren untersucht und bei einem Kapillarendurchmesser von 1.3 mm keinerlei Einwirkung auf die rote Cadmiumlinie festgestellt.

Die vorliegende Arbeit wurde im Physikalischen Institut der Johann Wolfgang Goethe-Universität zu Frankfurt am Main im Herbst 1936 begonnen und im Frühjahr 1938 zum Abschluß gebracht. Die Anregung dazu verdanke ich Herrn Prof. Dr. K. W. Meißner. Für die Ratschläge und die Unterstützung bei der schriftlichen Abfassung der Arbeit bin ich Herrn Prof. Dr. Czerny zu Dank verpflichtet.

Lebenslauf.

Am 15. Januar 1913 wurde ich als Sohn des Lehrers Julius Sohns und seiner Ehefrau Elisabeth, geb. Lauf, in Monzingen an der Nahe geboren. Ich besuchte 3 Jahre die Grundschule in Monzingen, 6 Jahre das Realgymnasium in Kirn und 3 Jahre die Oberrealschule in Idar-Oberstein, an der ich Ostern 1931 die Reifeprüfung ablegte. Anschließend widmete ich mich dem Studium der Physik, Geographie und Mathematik, und zwar 3 Semester an der Universität Göttingen, die übrigen an der Johann Wolfgang Goethe-Universität zu Frankfurt am Main. Die zur Vorlage dieser Dissertation notwendigen experimentellen Arbeiten wurden im Physikalischen Institut der Universität Frankfurt am Main ausgeführt und kamen im Frühjahr 1938 zum Abschluß.

Julius Sohns.